

SIMULATION STUDY OF VIRTUAL MODEL OF CENTRIFUGAL CLUTCH WITH ADJUSTABLE TORQUE POWER TRANSFER IN ASPECT OF HEAT FLOW

Summary

In this paper results of thermal analysis of conception a virtual model of centrifugal clutch with adjustable torque power transmission were presented. Numerical calculations of heat transfer, including convection and conduction of heat were presented. Details of the calculations progress and comparative analysis, that allowed heat flux density estimation, for different kind of heat exchange were explained.

BADANIA SYMULACYJNE WIRTUALNEGO MODELU SPRZĘGŁA ODŚRODKOWEGO Z REGULOWANYM MOMENTEM PRZENOSZENIA MOCY W ASPEKCIE PRZEPEŁYWU CIEPŁA

Streszczenie

W artykule przedstawiono sposób modelowania zespołów roboczych dla potrzeb prowadzenia analiz cieplnych na przykładzie wirtualnego modelu sprzęgła odśrodkowego z regulowanym momentem przenoszenia mocy. Omówiono przebieg obliczeń numerycznych występującego przepływu ciepła na drodze konwekcji i przewodzenia. Wyjaśniono szczegółowo przebieg ich realizacji oraz wykonano szereg analiz porównawczych, na podstawie których oszacowano wpływ charakterystycznych stałych na gęstość strumienia ciepła.

1. Wprowadzenie

W projektowaniu konstrukcji maszyn i urządzeń rolniczych częstokroć stosuje się podzespoły i zespoły robocze, w których występuje zjawisko tarcia i związana z tym dysypacja energii. Jednym z takich zespołów konstrukcyjnych jest sprzęgło cierne, w szczególności sprzęgło rozłączne, które pozwala na przekazywanie momentu obrotowego pewnie i w zadanym czasie. Zagadnienie przepływu ciepła jest zagadnieniem bardzo skomplikowanym. W uproszczonych obliczeniach sprzęgieł ciernych stosuje się proste modele matematyczne zawierające szereg stałych, lub podstawowych zależności matematycznych, opisujących zjawisko przepływu ciepła w sposób liniowy. Osiągnięcie większych dokładności wiąże się z koniecznością wykonania badań eksperymentalnych. Badania te są zwykle kosztowne, gdyż wymagają zbudowania prototypu. Znacznie bardziej ekonomicznym i szybszym rozwiązaniem jest stosowanie symulacji komputerowych. Okazuje się, że przy zachowaniu właściwej dyskretyzacji modelu geometrycznego i zadaniu właściwych warunków brzegowych, przypisanych do modelu obliczeniowego, wyniki badań symulacyjnych transferu ciepła w elementach roboczych są zbieżne z wynikami badań eksperymentalnych.

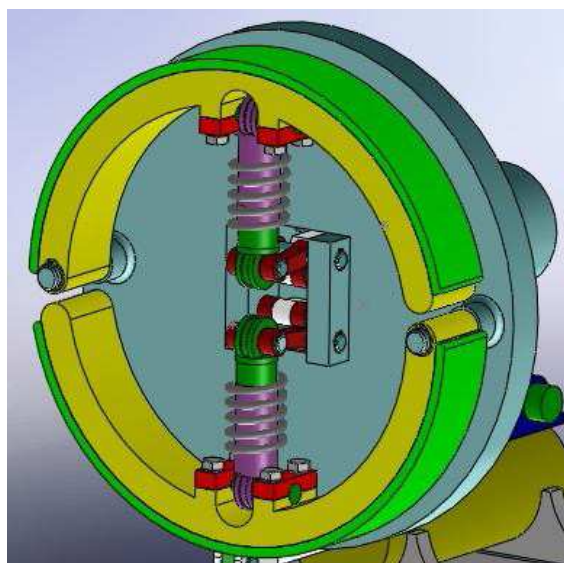
Głównym celem niniejszej pracy było uzyskanie rozkładu temperatur sprzęgła odśrodkowego. Poznanie tego rozkładu umożliwia dobór materiału ciernego pod względem odporności termicznej.

2. Obiekt badawczy

Rys. 1 przedstawia model CAD koncepcji sprzęgła odśrodkowego z regulowanym momentem tarcia.

Jest to sprzęgło niesymetryczne, dla którego kierunek obrotów ma istotny wpływ na wartość przenoszonego momentu. Dostępny przedział regulacji momentu, przy granicznej prędkości $157 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$, wynosi 162-302 Nm, dla kierunku, w którym siły tarcia zwiększają docisk i 98-140 Nm dla kierunku, w którym siły tarcia zmniejszają docisk.

Zasadniczy wpływ na wybór materiału miały obliczenia wytrzymałościowe. Spieki ceramiczno-metalowe spełniają wymagania projektowe pod względem nacisków dopuszczalnych. Obliczenia cieplne mają więc charakter obliczeń sprawdzających.



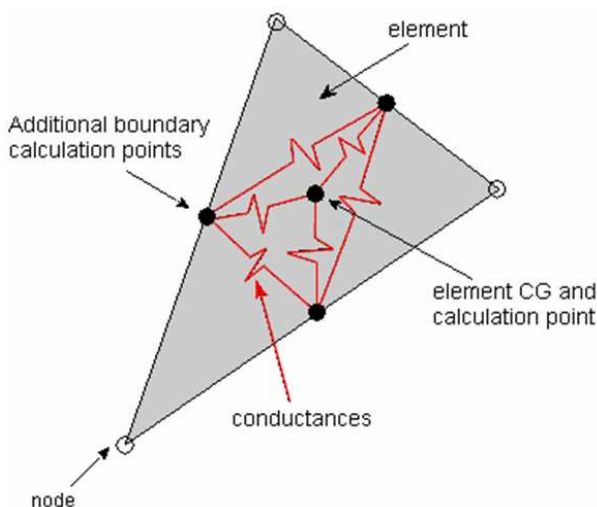
Rys. 1. Sprzęgło odśrodkowe niesymetryczne typu duplex z regulowanym momentem

Fig. 1. Asymmetric clutch "duplex" with adjustable moment

3. Obliczenia cieplne w systemie I-DEAS

System przeprowadza obliczenia cieplne w oparciu o metodę różnic skończonych, która jest metodą ogólną i łatwą w użyciu. Umożliwia przeprowadzanie analiz przepływu ciepła dla stanów ustalonych i nieustalonych z wykorzystaniem podstawowych zjawisk transferu jak: przewodzenie ciepła, konwekcja swobodna i wymuszona oraz radiacja. Ponadto, daje możliwość uwzględnienia przepływu czynnika oraz zmiany jego stanu skupienia.

Model obliczeniowy przygotowany jest podobnie jak w przypadku analiz wytrzymałościowych, przez wykorzystanie modelu geometrycznego. Stosować można dowolne kombinacje elementów 1D, 2D, 3D. Istotny jest fakt, że solver programu przeprowadza obliczenia w środku ciężkości elementu skończonego (CG – central gravity), a węzły wykorzystywane są wyłącznie do definiowania geometrii (rys. 2).



Rys. 2. Geometryczny środek elementu skończonego – punkt obliczeń [2]

Fig. 2. Geometric center of finite element – calculations point [2]

Powyższe implikuje następujące wnioski:

- stosowanie elementów wyższych rzędów nie wpływa na jakość uzyskiwanych wyników,
- warunki brzegowe są nakładane na elementy (bądź na geometrie obejmujące elementy).

4. Budowa modelu obliczeniowego i implementacja warunków brzegowych

Na rys. 3 przedstawiono model obliczeniowy wykorzystany do badań symulacyjnych przepływu ciepła. Do budowy siatki zastosowano elementy objętościowe czworosienne pierwszego rzędu.

Rozwiązanie zarysowanego w niniejszym opracowaniu problemu wymaga wyznaczenia mocy cieplnej dyssypowanej na okładzinach, stanowiącej główne obciążenie modelu obliczeniowego. Bilans energii w stanie ustalonym zapisany dla układu: część czynna sprzęgła – część bierna ma postać:

$$N_{wyj} + \dot{Q} = N_{wej} \quad (1)$$

gdzie:

N_{wyj} - moc odbierana przez część bierną sprzęgła [W],

\dot{Q} - strumień ciepła [W],

N_{wej} - moc przekazywana przez silnik do części czynnej sprzęgła [W].

Zależność (1) uwzględnia podstawowe i dominujące formy energii.

Ponieważ $M_2 \omega_2 + \dot{Q} = M_1 \omega_1$, więc $\dot{Q} = M_1 \omega_1 - M_2 \omega_2$. Mając na uwadze, że $M_1 = M_2 = M$, strumień ciepła wyraża się następująco:

$$\dot{Q} = M(\omega_1 - \omega_2), \quad (2)$$

gdzie:

ω_1 - prędkość kątowna części czynnej [$rad \cdot s^{-1}$],

ω_2 - prędkość kątowna części biernej [$rad \cdot s^{-1}$].

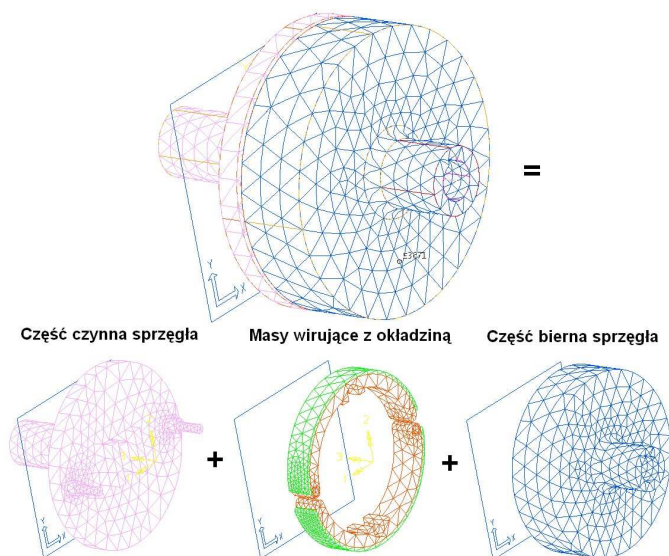
Zakładając, najgorszy przypadek, w którym część bierna sprzęgła została unieruchomiona, otrzymujemy:

$$\dot{Q} = M\omega_1 \quad (3)$$

Maksymalny przenoszony przez sprzęgło moment równy jest 302 Nm, co przy 1500 obr · min⁻¹ odpowiada mocy 47 kW. Wartość ta stanowi obciążenie cieplne, które przyłożono do okładzin sprzęgła przy założeniu równomiernego rozkładu (po 23,5 kW na każdą z obu okładzin).

W analizie uwzględniono następujące zjawiska związane z wymianą ciepła:

- przewodzenie ciepła w ciałach stałych,
- przejmowanie ciepła pomiędzy powietrzem omywającym sprzęgło a jego częściami, z wykorzystaniem elementów typu *Non-Geometric*,
- przepływ ciepła pomiędzy stykającymi się obiektami z wykorzystaniem oporu kontaktowego.



Rys. 3. Model obliczeniowy sprzęgła odśrodkowego do analiz cieplnych

Fig. 3. Computational model of a centrifugal clutch for thermal analysis

Pominięto wpływ radiacji. Ilość wypromieniowanej energii opisana jest prawem Stefana-Boltzmana i jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury. Ten rodzaj przekazywania energii zaczyna dominować dla wysokich temperatur (przyjmuje się, iż dla większych od 500K). W związku z tym badanie rozkładu temperatur powyżej tej temperatury nie ma technicznego znaczenia, ponieważ już przy 350°C wystąpią trwałe zmiany w materiale okładziny.

Obserwacja pola temperatur w funkcji czasu wiąże się z potrzebą przeprowadzenia analizy nieustalonego przepływu ciepła. Wówczas należy określić ciepło właściwe materiału. Dla stali przyjęto ciepło właściwe $c = 400 J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ oraz współczynnik przewodzenia ciepła $\lambda = 45 W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$.

Zjawisko transferu ciepła pomiędzy ciałem stałym a płynem określane jest mianem przejmowania ciepła. Ten sposób wymiany ciepła opisany jest równaniem Newtona:

$$q = \alpha(T_s - T_p), \quad (4)$$

gdzie:

q – strumień ciepła [$W \cdot m^{-2}$],

α - współczynnik przejmowania ciepła [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$],

T_s - temperatura powierzchni ścianki,

T_p - temperatura płynu.

Wartość współczynnika przejmowania ciepła α zależy od wielu czynników, w tym między innymi od: gęstości, ciepła właściwego, współczynnika lepkości, współczynnika przewodzenia ciepła, temperatury i ciśnienia płynu. Opierając się na danych zawartych w tab. 1 i zakładając, iż wymiana ciepła będzie odbywała się na drodze konwekcji wymuszonej określono $\alpha = 235 W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$. Wyniki analiz wykażą, jaki wpływ ma zmiana współczynnika α na rozkład temperatury.

Obecność płynu w analizach przepływu ciepła w systemie I-DEAS 12 symuluje się za pomocą elementów typu *Non-Geometric*. Do poprawnego ich zdefiniowania należy określić pojemność cieplną lub przypisać stałą temperaturę. W analizie wykorzystano obie techniki. We wnętrzu sprężęła znajduje się powietrze, które powinno reagować na zmiany temperatury. Na zewnątrz jednak, można przyjąć,

iż posiada ono stałą temperaturę $t=20^\circ C$. Pojemność cieplną wyznaczono ze wzoru:

$$C = \frac{dQ}{dr} = c \cdot m, \quad (5)$$

gdzie:

c - ciepło właściwe gazu [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$],

m - masa gazu [kg].

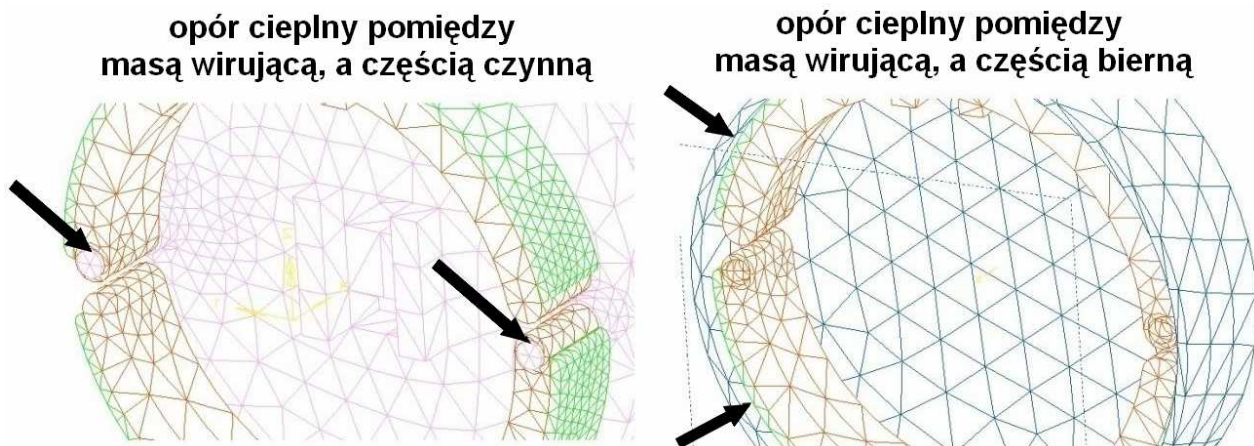
Wartość ciepła właściwego c jest funkcją wielu zmiennych, w tym również temperatury. Przyjęto jednak, że w przewidywanym zakresie temperatur zmienia się pomijalnie i oszacowano wartość ciepła właściwego powietrza na równą $c = 1 KJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$.

Do określenia skali transferu ciepła pomiędzy stykającymi się obiektami skorzystano z funkcji oporu kontaktowego. Wielkość ta określana jest za pomocą współczynnika h_s i zależy od: chropowatości powierzchni, nacisków jednostkowych, rodzaju ośrodka zawartego w szczelinie między powierzchniami i od temperatury. Na ogół jest on wyznaczany eksperymentalnie. Do analiz przyjęto $h_{s1} = 10 C \cdot W^{-1}$ dla przepływu ciepła pomiędzy masą wirującą a częścią czynną sprężęła oraz $h_{s2} = 0,1 C \cdot W^{-1}$ dla przepływu ciepła pomiędzy masą wirującą a częścią bierną sprężęła (rys. 4).

Tab. 1. Współczynniki przejmowania ciepła dla konwekcji swobodnej i wymuszonej wybranych substancji [3]

Tab. 1. Heat transfer coefficients for free and forced convection of chosen substances [3]

Rodzaj płynu	Konwekcja swobodna	Konwekcja wymuszona
Gaz	5 – 30	30 – 500
Woda	30 – 300	300 – $2 \cdot 10^4$
Olej	5 – 100	30 – 3000
Ciekłe metale	50 – 500	500 – $2 \cdot 10^4$
Wrząca woda	$2 \cdot 10^3$ – $2 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^3$ – 10^5
Kondensacja pary wodnej	$3 \cdot 10^3$ – $3 \cdot 10^4$	$3 \cdot 10^3$ – $2 \cdot 10^5$



Rys. 4. Funkcja oporów cieplnych zastosowana w modelu obliczeniowym

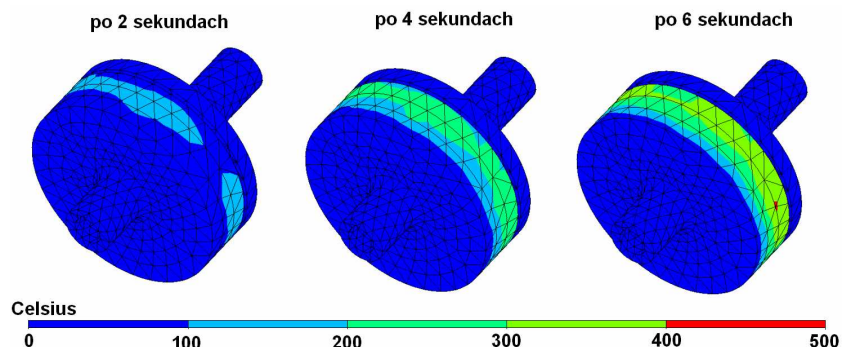
Fig. 4. The function of thermal resistance used in the computational model

Pomiędzy materiałem okładziny a materiałem bębna przyjęto mały współczynnik h_{s2} . Uwzględniono tym samym fakt, iż ciepło generowane jest na skutek tarcia obu części (ciepło ma wówczas możliwość swobodnego prze-

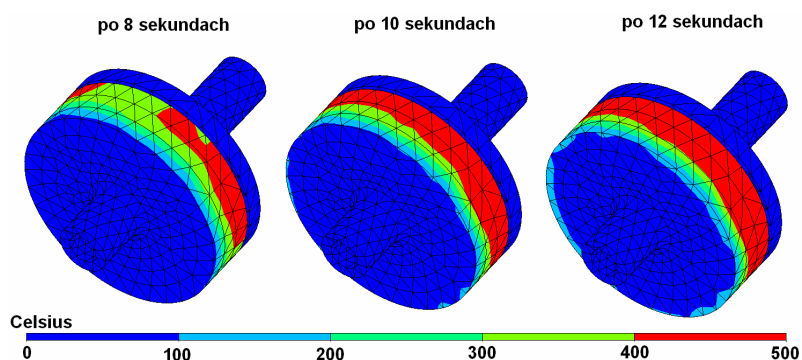
plywu w obu kierunkach). Odpowiednie rozparcelowanie ilości przekazywanego ciepła następuje na drodze obliczeń.

5. Rezultaty obliczeń i dyskusja wyników

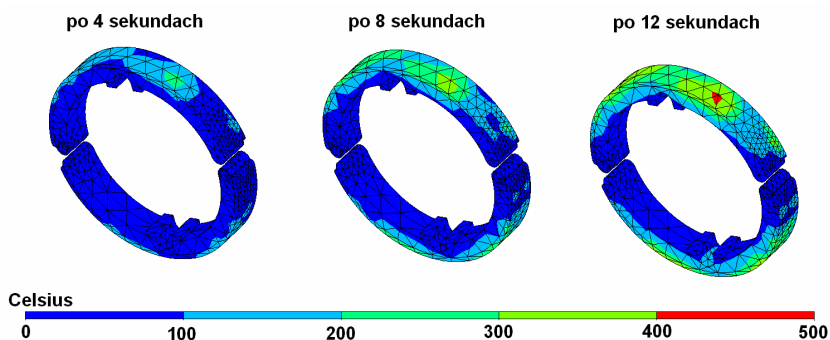
Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 5-8.



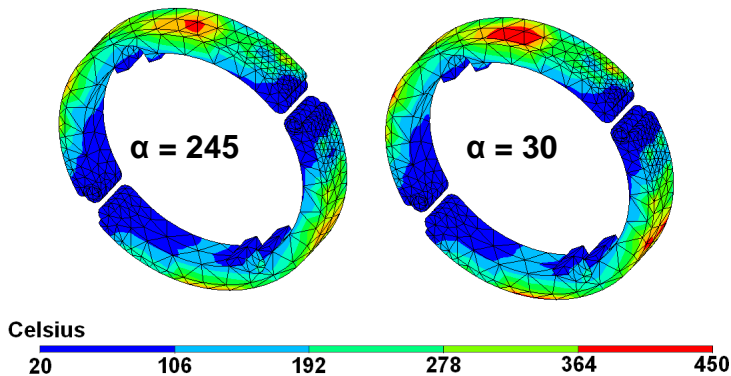
Rys. 5. Rozkład temperatury dla przedziału czasowego od 2 do 6 sekundy, widok ogólny
 Fig. 5. The temperature distribution for the time interval from 2 to 6 seconds, the general view



Rys. 6. Rozkład temperatury dla przedziału czasowego od 8 do 12 sekundy, widok ogólny
 Fig. 6. The temperature distribution for the time interval from 8 to 12 seconds, the general view



Rys. 7. Rozkład temperatury dla przedziału czasowego od 4 do 12 sekundy, widok na masy wirujące
 Fig. 7. The temperature distribution for the time interval from 4 to 12 seconds, view of the rotating mass



Rys. 8. Wpływ zmiany współczynnika α , na zmianę rozkład temperatury
 Fig. 8. Effect of change of the coefficient on the change of temperature distribution

Z uzyskanej mapy temperatur wynika, że przekroczenie temperatury dopuszczalnej dla wybranego materiału nastąpi po 6 sekundach. Czas ten jest stosunkowo krótki i nie pozwoli na uzyskanie prędkości nominalnej, przy maksymalnym obciążeniu. Okazuje się, że to nie kryterium wytrzymałościowe, lecz termiczne będzie miało istotny wpływ na szczegółowe rozwiązania konstrukcyjne urządzenia. Ponadto, w obliczu tak wielu założeń i uproszczeń przekonać się można jak niezmiernie istotnym aspektem wykonywania analiz termicznych jest przygotowanie modelu i jak wiele problemów stwarza ten etap przeprowadzania analiz. Z pewnością w przypadku analiz cieplnych jest to zagadnienie bardziej skomplikowane, niż dla analiz wytrzymałościowych. Dla wielu przypadków nie znaleziono informacji o wielkościach wymaganych stałych do badań (np. oporów termicznych, współczynników przejmowania ciepła). Zastosowane uproszczenia mogą być na tyle daleko idące, że

uzyskiwane rezultaty należałoby traktować jako wyniki jakościowe. To znaczy, że wskazują miejsca, w których może dojść do przekroczenia temperatur, i na które trzeba zwrócić uwagę. Zwiększenie staranności przygotowywania analiz z pewnością pozwoli uzyskać wyniki ilościowe, nie ulega jednak wątpliwości, iż powinny one zostać sprawdzone eksperymentalnie.

6. Literatura

- [1] Mazanek E.: Przykłady obliczeń z podstaw konstrukcji maszyn. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2005.
- [2] Dokumentacja techniczna systemu I-DEAS 12.
- [3] Wiśniewski S.: Wymiana ciepła. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2000.
- [4] Szczepaniak J.: Współczesne narzędzia wspomagające projektowanie maszyn rolniczych. Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna, 2008, nr 1, s. 20-24.